半干旱区湖盆景观格局脆弱性及其影响因素
——以凉城县为例

张云霞[1]， 张金茜[1,2]， 巩 杰[1]

（1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；
2. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875）

摘 要： 基于1980—2020年6期景观类型数据，分析了凉城县湖盆景观及其变化过程；利用景观敏感度指数和景观适应度指数构建了一种景观脆弱性综合指数，分析了县域景观格局脆弱性时空分异及其影响因素。研究表明：（1）近40 a来凉城县景观类型变化差异明显。除未利用地外，1980—1995年耕地、林地及草地动态度最大，1995—2010年各景观类型动态度均较大，2010—2020年水域、建设用地动态度最大。（2）1980—2020年全县景观格局脆弱性均以中、较高为主，面积达到70%以上，高值区集中分布在凉城中部和东南部，低值区位于岱海及其北部；景观脆弱性综合指数呈先下降后升高再下降趋势，区域生态环境开始好转。（3）研究区生态环境脆弱性在不同景观类型、地形上差异显著。零散分布的林、草地脆弱性较高，水域最低；海拔<1300 m、坡度<5°的区域景观格局脆弱性最低，海拔1700~1900 m、坡度25°~40°区域的最高。（4）总人口数、水域面积和耕地面积是湖盆景观格局脆弱性的主要影响因子；相对气候因子，人类活动对研究区生态环境的影响更大。因此，优化景观结构、减少过度扰动、保护水资源及水环境等，是降低凉城景观格局脆弱性和强化生态保护建设的主要手段。

关键词： 湖盆景观；景观格局脆弱性；景观格局脆弱性综合指数；影响因素；凉城县

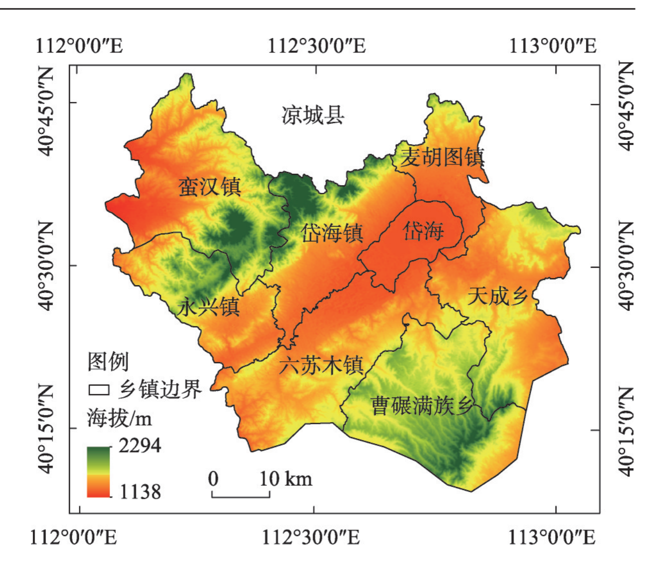
景观格局是不同景观斑块在时空上镶嵌组合的综合产物，也是景观空间异质性及其生态过程相互作用的结果，对维持生态系统稳定性具有重要意义[1]。随着人口增长和社会经济快速发展，景观格局受人类干扰日益频繁，导致生态环境压力和风险增加，引起水资源短缺、生物多样性退化及粮食紧缺等问题[2-4]，一定程度上影响着区域可持续发展[5]。因此，基于景观格局变化的生态评价逐渐成为新的研究热点[6-8]。当前，国内外在该方面的研究主要有景观类型变化[9-10]、景观生态风险[11]、景观生态安全[12]等，已形成较成熟的研究体系，但对景观格局脆弱性的研究还处于起步阶段[13]。

景观格局脆弱性起源于生态脆弱性，是从景观层面研究格局信息与生态脆弱性之间的关系，建立具有生态学内涵的指标体系，从而为生态环境脆弱性评价提供新思路[4,14]。景观格局脆弱性是指区域景观格局受到外界扰动时表现出的敏感性和缺乏适应能力使其结构、功能及特性发生变化的一种性质，其大小常用景观脆弱度指数衡量[15]。该指数由景观适应度指数和景观敏感度指数构建而成，包括景观类型、景观水平尺度等多个景观指数，可准确地揭示区域景观格局脆弱度及其动态变化[14]。目前，相关研究集中在脆弱性评价及其时空变化分析等，Preston 等[16]探讨了脆弱性评价体系的构建方法；Min 等[17]基于多个景观指数分析了不同景观格局对洪水脆弱性的影响，提出了沿海景观模式规划方针和恢复策略；张佳辰等[18]通过景观类型脆弱度指数评价了青岛市海岸带生态脆弱性的时空规律，并发现未利用地、草地和林地脆弱度最高，水域脆弱度最低。但现阶段脆弱性的定量评价体系尚需不断完善[14]，景观格局脆弱性驱动因素的研究以景观类型和地形为主[19]，针对气候及社会经济要素的研究较少；研究区多以沿海平原或经济较为发达的区域为主，针对地貌复杂多样、生态脆弱和经济欠发

收稿日期： 2022-01-26； **修订日期：** 2022-03-04
基金项目： 第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0603）资助
作者简介： 张云霞（1996-），女，硕士研究生，主要从事土地变化科学与景观生态研究. E-mail: zhangyunxia20@lzu.edu.cn
通讯作者： 巩杰. E-mail: jgong@lzu.edu.cn

达的干旱区的研究报道较少。因此,亟待开展相关研究,为干旱区景观格局认知和管理提供科学支撑。

凉城县位于内蒙古中部,是岱海流域的主体,也是岱海湖所在地,对中国“两屏三带”生态安全战略格局具有重要作用[20]。随着社会经济的快速发展,人类活动对景观格局扰动日益频繁,导致全县生态环境出现恶化现象,如岱海湖面萎缩、水位下降、水质恶化等。鉴于此,本文以凉城县为研究区,基于景观脆弱度指数构建了一种景观脆弱性综合指数,揭示了1980—2020年景观格局及其脆弱性时空变化,探讨了不同景观类型、地形及多个社会经济要素对景观格局脆弱性的影响机制,旨在为土地利用及景观优化、流域生态综合治理等提供科学支撑。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5447号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Location of the study area

1 数据与方法

1.1 研究区概况

凉城县(112°02′~113°02′E、40°10′~40°50′N)位于内蒙古自治区乌兰察布市,是晋、蒙、冀三省交界地带的中心。全县国土面积约3452.47 km^2,其中山地丘陵约占75%、滩川占21.1%、岱海占4.7%,有“七山一水二分滩”之称,地形特征是四面环山、中怀岱海盆地,地势起伏较大,海拔为1138~2294 m。凉城属于半干旱大陆性季风气候,寒冷干燥,雨少风多;年均气温2~5 ℃;年均降水量约为392.37 mm;无霜期4个月左右。多年来凉城县是以农业为主体,林、渔、牧、旅游业共同发展的经济局面。凉城因水而兴,河流所属水系为岱海、黄河及永定河,其中注入岱海的河流数约占50%,岱海已成为全县生态环境改善和社会经济发展的重要抓手。本研究中以1980年岱海水域为基准,进行不同时期岱海面积分析(图1)。

1.2 数据来源与处理

研究时段为1980年、1995年、2000年、2010年、2015年和2020年,景观类型矢量数据(1:100000)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)。按照国家级土地利用一级分类标准,将凉城县划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种景观类型(Kappa系数均大于0.90,满足景观空间分析的精度)。数字高程模型(DEM)(30 m ASTER GDEM)来源于地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/)。气象数据来源于凉城县气象局。农作物播种面积、牲畜存栏数、总人口数及GDP来源于《内蒙古自治区统计年鉴》和《凉城县志》等。

1.3 研究方法

1.3.1 单一景观类型动态度 表示研究区在一定时间内某一种景观类型的变化速度。计算公式如下[21]:

$$K_i = \frac{U_{it2} - U_{it1}}{U_{it1}} \times \frac{1}{t2 - t1} \times 100 \tag{1}$$

式中:K_i 为 $t1$ 到 $t2$ 内第 i 类景观类型的动态度;i 为第 i 类景观类型;$t1$、$t2$ 为始末时间;U_{it1}、U_{it2} 分别为 $t1$、$t2$ 第 i 类景观类型的面积。

1.3.2 景观脆弱度指数 基于景观格局脆弱性内涵,选取景观敏感度指数和景观适应度指数构建景观脆弱度指数(Landscape Vulnerability Index,LVI),计算公式为:

$$\mathrm{LVI} = \mathrm{LSI} \times (1 - \mathrm{LAI}) \tag{2}$$

$$\mathrm{LSI} = \sum_{i=1}^{n} U_i \times V_i \tag{3}$$

$$\mathrm{LAI} = \mathrm{PRD} \times \mathrm{SHDI} \times \mathrm{SHEI} \tag{4}$$

$$U_i = aFN_i + bFD_i + cDO_i \tag{5}$$

式中:LVI为景观脆弱度指数;LSI为景观敏感度指数;LAI为景观适应度指数;i 为景观类型;n 为景观类型数目;U_i 为景观干扰度指数;V_i 为景观类型易

损度,标准化处理后其值分别为:耕地0.14、林地0.23、草地0.23、水域0.04、建设用地0.04、未利用地0.32[14];PRD为斑块丰度密度指数;SHDI为香农多样性指数;SHEI为香农均匀性指数;FN_i为景观破碎度指数;FD_i为分维数指数;DO_i为优势度指数;a、b、c为各指数权重,分别为:0.5、0.3和0.2[14]。

为进一步比较凉城县多年来景观格局脆弱性的变化趋势及整体差异,本文改进并提出了一种景观脆弱性综合指数(Landscape Vulnerability Integrated Index,LVII),其计算公式为:

$$\mathrm{LVII}=\sum_{i=1}^{n}D_i\times\frac{A_i}{S} \tag{6}$$

式中:D_i表示景观格局脆弱性等级(i=1,2,3,4,5);A_i表示i等级的面积;S表示区域总面积。

1.3.3 半变异函数 景观脆弱度指数是一种区域变量,其空间异质性是由随机误差和空间自相关引起的。半变异函数的拟合参数可准确表征这种异质性。其公式为[22]:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i+h)\right]^2 \tag{7}$$

式中:$\gamma(h)$为间距为h时的半方差值;h为样本距;$N(h)$为间距为h时的样本总对数;$Z(x_i)$、$Z(x_i+h)$表示x_i、x_i+h处的景观脆弱度指数。本文利用GS+9.0软件生成拟合参数。

1.3.4 空间自相关分析 空间自相关分析可以反映要素在空间上的依赖性。基于GeoDa软件,通过构建权重矩阵计算全局、局部Moran's I指数,从而探究区域不同年份各网格单元景观脆弱度指数与其相邻单元的空间相关性。

1.3.5 灰色关联度分析 灰色关联度分析源自于灰色关联系统,是根据参考序列与母序列发展态势的相似性表征其关联性。其步骤为:首先无量纲化处理原始数据;然后计算关联系数;最后得出关联系数的平均值即关联度[23]。

2 结果与分析

2.1 凉城县湖盆景观变化

2.1.1 景观类型时空变化 凉城县景观类型空间格局如图2所示,耕地主要分布在岱海湖周边,林地主要位于凉城西北部(蛮汉山)和东南部(马头山),草地分布较零散,水域以岱海为主,建设用地分布较均匀,但多位于岱海盆地(图2)。总体上空间格局呈带状分布,分为西北部农林牧交错带、岱海盆地经济核心区、东南部丘陵农牧带。

1980—2020年凉城县景观类型变化较为明显(图3),全县主要景观类型为耕地、草地,其中

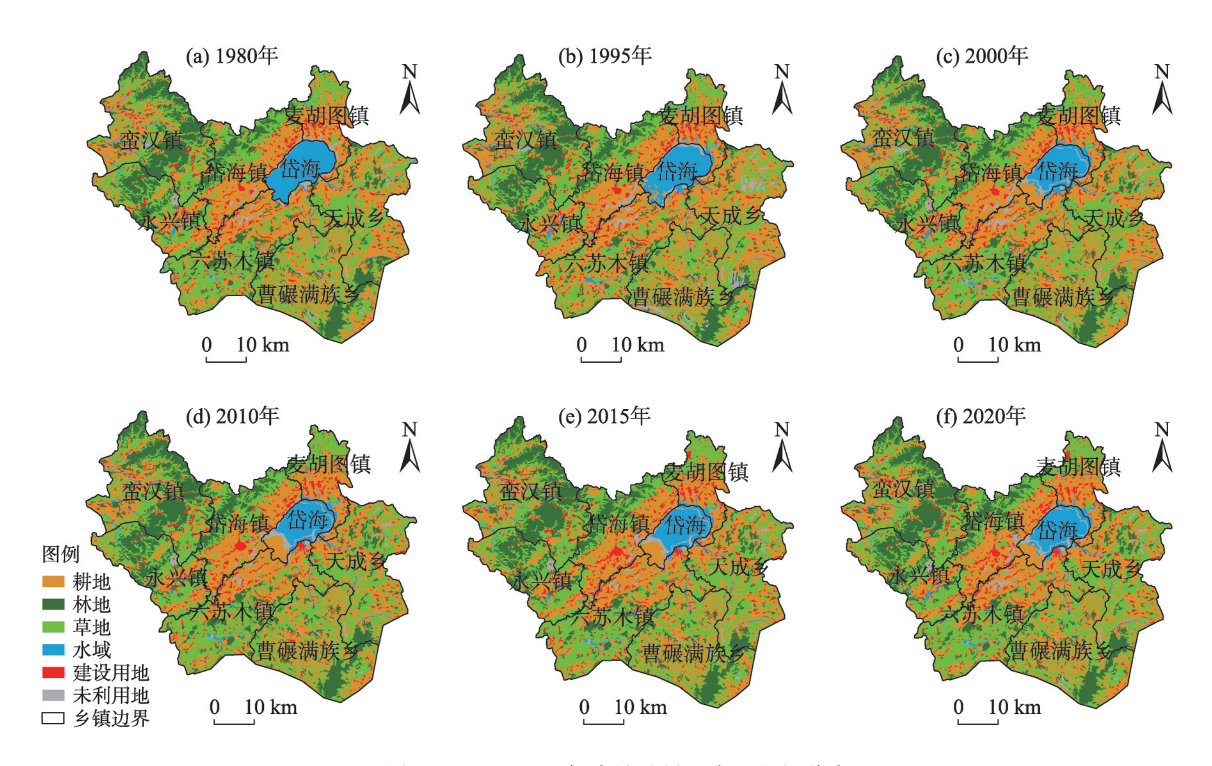


图2 1980—2020年凉城县景观类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of landscape types in Liangcheng Country from 1980 to 2020

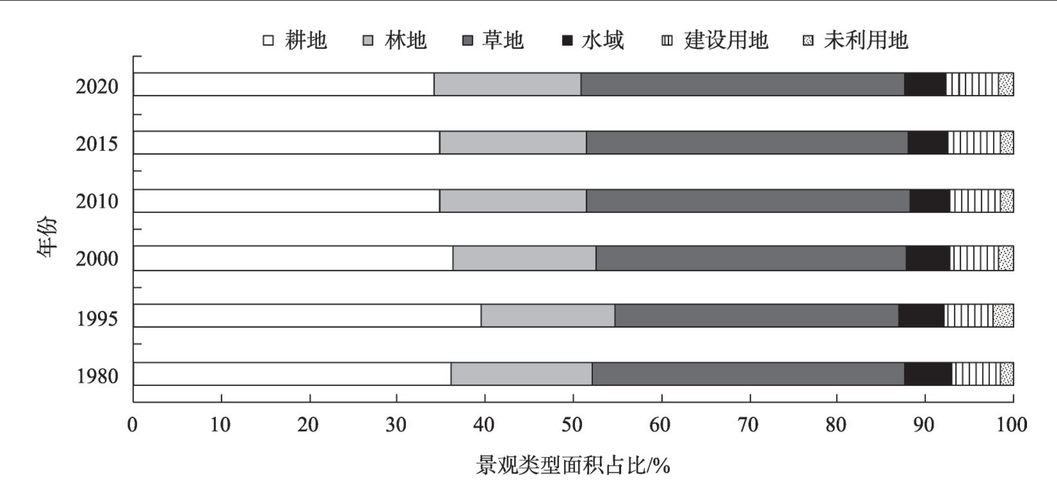


图3 1980—2020年凉城县各景观类型面积占比

Fig. 3 Area proportion of various landscape types in Liangcheng Country from 1980 to 2020

1980—2000年第一优势景观类型为耕地,1995年面积达到最大;而2000—2020年耕地面积持续下降,草地成为第一优势景观类型,2020年面积达到最大。林地是第三优势景观类型,面积变化趋势与草地一致。1980—2010年水域面积持续下降,2010—2020年逐渐增大。近40 a建设用地面积持续增加,未利用地面积占比最小。

2.1.2 景观动态度变化 1980—2020年凉城县景观类型动态度变化复杂(图4)。耕地面积在1980—1995年增速最大,1995年以来持续呈减小趋势,1995—2000年减速最大。林地在1980—1995年大幅转为耕地;1995—2000年林地面积恢复,2000—2010年以0.40%的动态度增长;2010—2020年小幅下降。草地面积与林地面积的变化趋势相似,但2015—2020年以0.16%的动态度增长,整体上草地变化速度较林地大。水域面积在1980—2010年不断减小,但2010年以来缓慢恢复。建设用地面积在1980—2015年快速上升,2015年缓慢上升。相较其他景观类型,未利用地变化速度最大,1980—1995年最为显著。可以看出,1980—1995年期间凉城县产业发展以农业为主,即以扩大耕地规模来满足生产需求[24];1995—2010年大力发展建筑业及工矿业,同时岱海水资源被大幅开采;2010—2020年城镇化加快,但保护岱海环境的意识不断增强,水域面积得以缓慢恢复。

2.2 景观格局脆弱性时空演变

结合凉城县实际情况和前人研究结果,以3 km×3 km网格为基本单元,70 m×70 m为最优粒度[14],基于半变异函数模型参数拟合,利用ArcGIS 10.4中的地统计模块进行克里金插值,得到凉城县

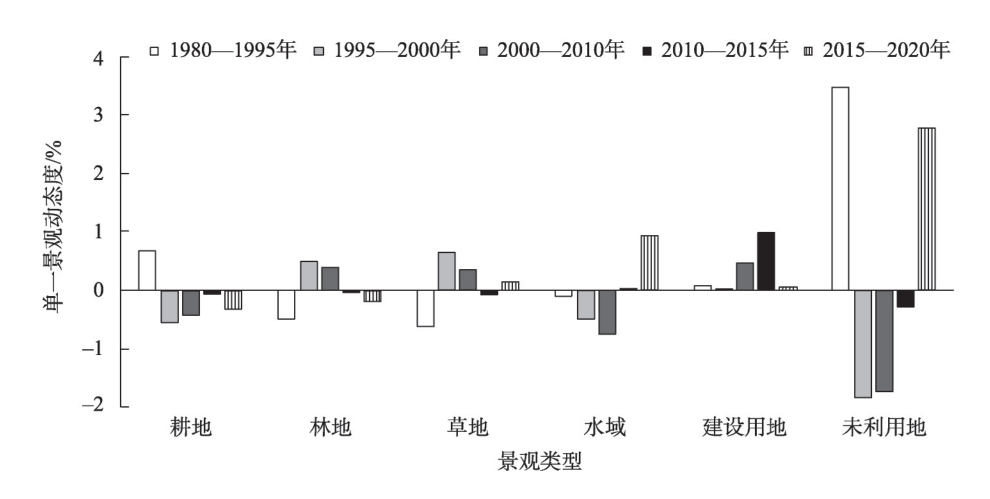


图4 1980—2020年凉城县单一景观类型动态度

Fig. 4 Single landscape type dynamic degree in Liangcheng Country from 1980 to 2020

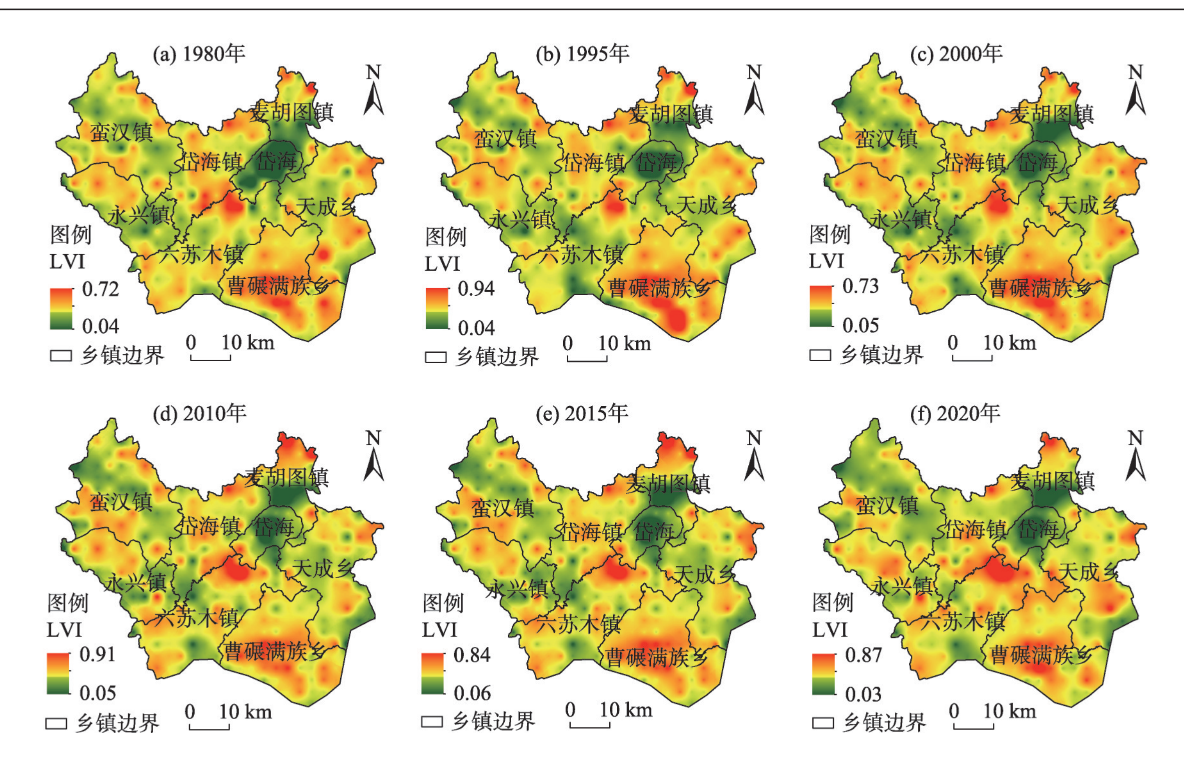


图5 1980—2020年凉城县景观脆弱性空间分布

Fig. 5 Continuous spatial distribution of landscape vulnerability index in Liangcheng Country from 1980 to 2020

1980年、1995年、2000年、2010年、2015年和2020年景观脆弱度指数空间分布图(图5)。可以看出，1980—2020年凉城县景观格局脆弱性空间分布相似，表明区域脆弱性分布对地理格局具有较强依赖性[25]。高值区集中在凉城东南部和中部，因为东南部以耕地和草地为主，优势度较高，破碎化严重，导致景观格局敏感性较高；中部以耕地为主、建设用地零散镶嵌其中，该区域景观丰富度小，均匀性差，外界干扰频繁，因而脆弱性较高。低值区主要位于岱海及麦胡图镇中南部等(图5)。LVI最大值、最小值相对稳定，但2000年LVI最大值明显降低，由于1995—2000年景观动态度大，景观格局显著变化，导致个别高值区格网单元LVI值下降。

本研究将景观脆弱性划分为5个等级：低脆弱区(LVI<0.20)、较低脆弱区(0.20~0.30)、中等脆弱区(0.30~0.40)、较高脆弱区(0.40~0.50)和高脆弱区(LVI>0.50)，来进一步分析区域脆弱性时空变化。结果显示，研究区景观格局脆弱性以中、较高等级为主，占总面积的70%以上(图6)。各脆弱性等级在不同时段内变化差异明显，整体上来看，低脆弱度区面积呈先降后升，由于水域是该等级主要的景观类型，而水域面积先减后增；较低脆弱度区面积呈波动式上升；中等脆弱度区域面积先升后降再升，较高等级面积变化则相反，中、较高等级区域范围较广，其变化受全县景观格局和社会经济发展的影响；高脆弱度区域面积呈先下降后上升再下降波动，其中2015—2020年下降最为显著，因为曹碾满族乡中部林地、草地斑块形状简单化，景观格局敏感性降低(图5)。

近40 a凉城县景观格局脆弱性(LVII)呈先降、后升再降的趋势(图6)。1980—1995年，LVII值下降，景观类型的适当调整对生态环境产生积极影响；1995—2015年LVII持续上升，快速城镇化阶段土地资源开发强度增大，景观破碎化加剧，生态系统适应能力不断降低；2015—2020年LVII值快速下降，随着生态问题治理的推进，人们开始整合土地资源，优化景观格局，如岱海环境整治等，区域生态环境脆弱性也随之下降。

2.3 景观格局脆弱性空间自相关分析

凉城县1980年、1995年、2000年、2010年、2015年和2020年景观脆弱度指数的全局Moran's I分别为0.163、0.176、0.152、0.160、0.162和0.186，该指数均为正且总体呈上升趋势，表明近40 a来凉城县景观格局脆弱性存在空间正相关关系，且空间聚集性增强。但在1995—2000年Moran's I从0.176下降到0.152，说明该时段内景观格局脆弱性空间分布有

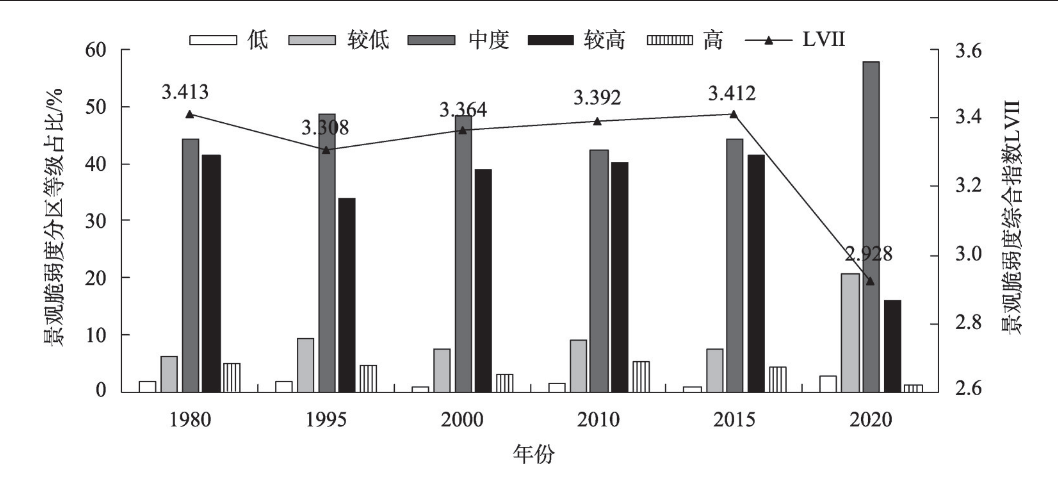


图6 1980—2020年凉城县景观格局脆弱性等级占比及LVII值变化

Fig. 6 Proportion of landscape pattern vulnerability level and LVII in Liangcheng Country from 1980 to 2020

分散趋势，出现多中心分布格局。

凉城县景观脆弱度高-高值区主要分布在曹碾满族乡中部和六苏木镇西北部（图7），其中曹碾满族乡零散分布的耕地向林、草地转化，提高了景观连通性，致使该区域高脆弱度范围不断缩小；2000年后城镇化建设加快，建设用地面积快速扩张，尤其六苏木镇西北部增幅最明显，导致该区域景观破碎化加剧，高脆弱度范围不断扩大。景观脆弱度低-低值区集中分布在岱海及麦胡图镇中南部，其面积先减后增（图7），1980—2010年岱海周边低-低值区范围在缩小，而2010—2020年其范围开始增大，与近年来岱海环境治理政策的实施有关；此外，近年来蛮汉镇中部出现带状分布的低-低值区，这可能与该区域景观类型间的转化有关。

2.4 景观格局脆弱性变化特征

2.4.1 不同景观类型的脆弱性变化特征 为了进一步明确区域景观格局脆弱性的演变特征，通过统计各景观类型的LVI最值、变化范围及LVII值，对不同

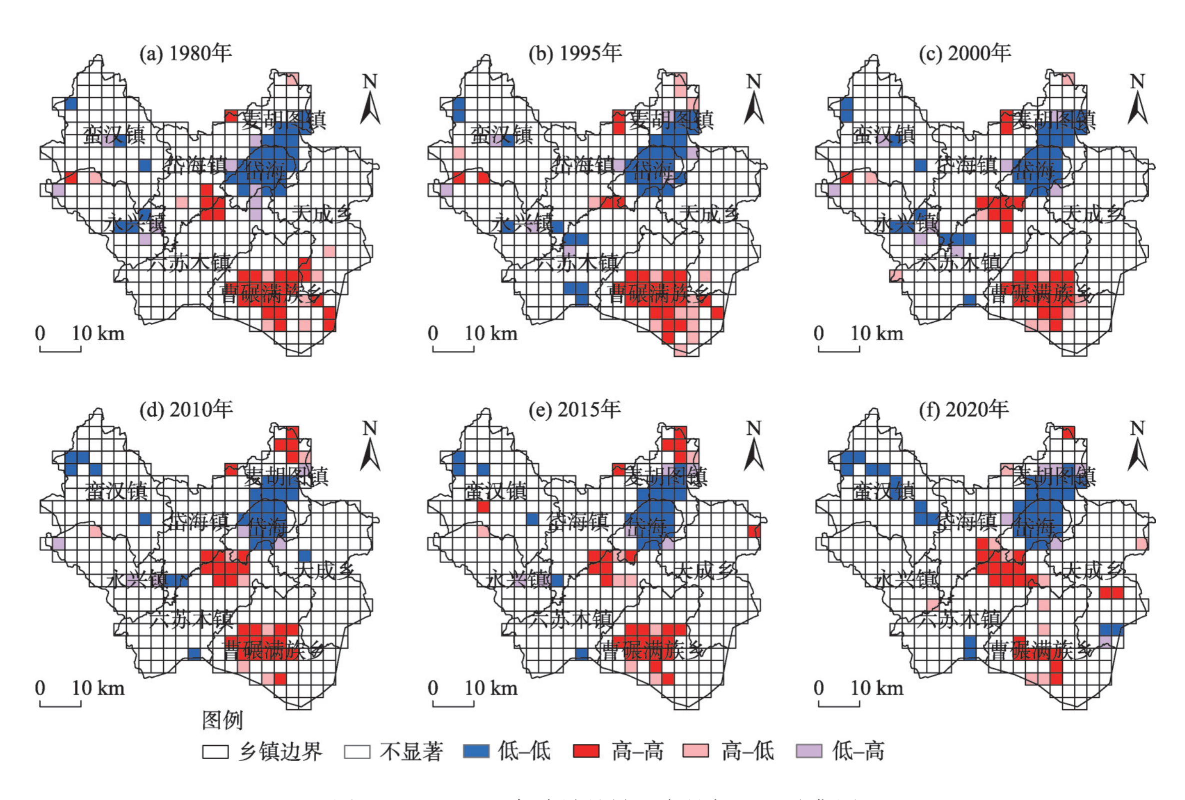


图7 1980—2020年凉城县景观脆弱度LISA聚集图

Fig. 7 Lisa aggregation map of landscape vulnerability index in Liangcheng Country from 1980 to 2020

表1 1980—2020年凉城县各景观类型LVI基本统计量

Tab. 1 Basic statistics of LVI of various landscape types in Liangcheng County from 1980 to 2020

	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
1980年	0.122	0.721	0.167	0.639	0.135	0.721	0.037	0.500	0.176	0.699	0.184	0.595
1995年	0.048	0.936	0.040	0.747	0.073	0.865	0.039	0.530	0.126	0.902	0.158	0.690
2000年	0.072	0.728	0.054	0.622	0.126	0.644	0.061	0.476	0.154	0.686	0.203	0.551
2010年	0.086	0.905	0.094	0.805	0.108	0.718	0.049	0.524	0.141	0.736	0.208	0.599
2015年	0.115	0.836	0.106	0.709	0.141	0.703	0.056	0.506	0.144	0.745	0.227	0.565
2020年	0.053	0.522	0.197	0.540	0.206	0.590	0.110	0.443	0.108	0.494	0.178	0.580
变化	0.693		0.567		0.575		0.438		0.569		0.404	

景观类型脆弱性的差异进行分析。由表1可知,研究区景观格局脆弱性在不同景观类型之间有显著差异。不同时期内耕地的LVI最值波动程度最大,同一时期内耕地的LVI值变化最大,变化范围均值为0.693,说明研究区耕地脆弱性处于多个等级的不稳定态势;水域的LVI最值变化最小,其次为未利用地,而未利用地的LVI变化范围最小(均值为0.404),其次为水域,说明未利用地、水域脆弱度等级处于较稳定状态。但是在过去40 a,凉城县不同景观类型LVII值具有较好的一致性(表2),从均值来看,林地、草地LVII值最大,因为仅分布于蛮汗镇的部分林地和天成乡中部的草地,集中连片,生态系统较为稳定,脆弱性较低;而大部分林地、草地与其他景观类型交错分布,斑块破碎化严重,脆弱性高;水域LVII值最小,水域以岱海为主,聚集度高,抗干扰能力强,因而脆弱性最低。

2.4.2 *景观格局脆弱性在地形上的变化特征* 为进一步探讨区域景观格局脆弱性在垂直空间上的变化规律,采用海拔和坡度2个地形指标,分析景观格局脆弱性与地形因子之间的相关性。本研究将海拔、坡度划分为5个等级(表3),分别统计研究区6个时期不同区间内的LVII值。由表3可见,随着海拔、坡度的增大,LVII值呈先上升后下降规律。从多年均值来看,海拔<1300 m、坡度<5°的区域全县LVII最低,由于岱海盆地地势平坦,气候宜人,岱海坐落其中,虽然人口密度较高,但景观格局较为合理,因此该区域脆弱性最低。而海拔1700~1900 m、坡度25°~40°区域属于高脆弱度区,这是由于该区域海拔高、地势陡,容易发生水土流失等自然灾害,加之人们不合理的坡地开垦、建设用地扩张等活动导致区域生态环境稳定性差。

2.5 景观格局脆弱性的影响要素

为了更好地探讨景观格局脆弱性影响因素,本文引入灰色关联度分析各因子对景观格局脆弱性贡献作用大小。依据脆弱性内在性质和研究区发展形式,选取总人口数、水域面积、农作物播种面积、气温、降水、牲畜存栏数和GDP,计算与LVII的关联度,其值依次为0.952、0.905、0.868、0.820、0.767、0.716和0.435。凉城县景观格局脆弱性与各因子的灰色关联度在0.435~0.952,平均值为0.780,除GDP外,其他因子与LVII值均有很高的关联性。其中,总人口数的灰色关联度最高,由于总人口数

表2 1980—2020年凉城县各景观类型LVII值

Tab. 2 LVII of various landscape types in Liangcheng County from 1980 to 2020

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980年	3.473	3.534	3.551	1.963	3.250	3.135
1995年	3.303	3.543	3.426	2.192	3.056	3.303
2000年	3.371	3.505	3.475	2.337	3.118	3.286
2010年	3.383	3.540	3.524	2.261	3.092	3.251
2015年	3.400	3.536	3.540	2.322	3.194	3.307
2020年	3.001	2.901	3.035	1.879	2.769	2.896
多年平均	3.322	3.427	3.425	2.159	3.080	3.196

表3　凉城县各时期不同海拔、坡度等级LVII值

Tab. 3　LVII on different altitudes and slopes in different levels in Liangcheng Country

	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ		Ⅳ		Ⅴ	
	低海拔	平坡	较低海拔	缓坡	中等海拔	斜坡	较高海拔	陡坡	高海拔	急坡
	<1300 m	<5°	1300~1500 m	5°~15°	1500~1700 m	15~25°	1700~1900 m	25°~40°	>1900 m	>40°
1980年	2.963	3.224	3.380	3.512	3.742	3.593	3.791	3.603	3.490	3.486
1995年	2.868	3.126	3.218	3.381	3.640	3.558	3.817	3.611	3.532	3.497
2000年	2.968	3.204	3.308	3.437	3.657	3.557	3.782	3.582	3.440	3.503
2010年	2.993	3.213	3.331	3.473	3.710	3.604	3.775	3.628	3.438	3.548
2015年	3.044	3.245	3.358	3.489	3.704	3.604	3.776	3.617	3.444	3.542
2020年	2.632	2.824	2.948	3.005	3.127	2.978	3.133	2.916	2.733	2.805
多年平均	2.912	3.139	3.257	3.383	3.597	3.483	3.679	3.493	3.346	3.397

增长是加速城镇化的内生动力，城镇化导致各类房屋建筑用地及工业园区快速扩张，景观格局变化频繁，区域生态环境随之变化；其次为水域面积、农作物播种面积，这说明人为干扰对区域生态环境的影响大于气候要素的影响。LVII与气温、降水及水域面积呈负相关，与其他因子呈正相关。因此，减少人类的过度干扰及合理利用自然资源对保护全县生态环境至关重要。

3　讨 论

景观格局变化与生态过程密切相关，基于景观格局法开展生态脆弱性的研究有利于评价区域生态环境质量。本研究在借鉴和参考国际生态脆弱性综合指数研究方法的基础上[25]，提出了景观脆弱性综合指数。该指数有利于从不同层面分析区域脆弱性，同时，灰色关联度可为驱动因素分析提供新思路。本文结合LVI、LVII评价了近40 a凉城县景观格局脆弱性变化趋势，并定量、直观地揭示了各要素与区域脆弱性的关系。本研究提供了湖盆景观格局脆弱性及其影响因素研究方法和案例，构建的评价体系具有可重复性，可为相似区域提供借鉴和启发。

本研究表明，1980—2020年凉城县景观格局脆弱性总体呈下降趋势，低脆弱区主要位于岱海及其周边。这与冯琰玮等[26]、徐智超等[27]、赖其力孟格[28]的研究结果一致，可见LVII可以用于揭示区域脆弱性。从景观格局脆弱性与景观类型的关系表明：凉城县耕地LVI变化最大，林、草地脆弱性较高，这是因为耕地是凉城的主要景观类型，分布范围广，因此LVI变化较大；同时，林、草地斑块破碎且形状复杂，与其他景观类型交错分布。加之研究区属半干旱区丘陵盆地，地势陡峭、沟壑纵横、水土流失严重、植被长势较差[29]，因而脆弱性较高。此外，研究发现脆弱度较高的景观类型稳定性较弱，抵抗外界侵袭能力较差，极易被周边变化所影响[18]。随着2000年以来退耕还林(草)工程、禁牧舍饲养殖等政策的实施，导致林、草地面积不断增大，但2000—2010年研究区LVII呈上升趋势，2015年后林、草地脆弱性明显下降，这可能是因为退耕还林(草)工程初期生态恢复的效用还未凸显出来；如李建飞等[30]发现，2000—2010年凉城县植被处于退化状态。同时，景观格局脆弱性变化受地形影响明显，近40 a来岱海盆地LVII总体上升，这主要是地势相对平坦，资源丰富，人口密度大，生态压力大，脆弱性升高。总人口数和水域面积是影响县域景观格局脆弱性的2个主要因素，这可能是人口越多、人类活动强度越大，频繁扰动和塑造区域景观格局所致；岱海水域面积变化剧烈，如1980—2010年岱海面积持续缩小，LVII值由1.707上升到2.450，这主要是工农业大量耗水、工业污水排放及地下水环境恶化所致[31-32]；由于岱海保护政策的实施，2010—2020年岱海水域面积得到缓慢恢复。

可见，人类活动对区域脆弱性影响较大；国家和区域政策等也是影响脆弱性变化的重要因素。因此，未来应合理利用水土资源，减少人类不合理活动影响，宜耕则耕、宜林则林、宜建则建，提高林、草地连通性及稳定性；实施岱海流域综合治理，降低流域生态脆弱性，实现人与自然及经济协调发展。

本文在构建中小尺度(县域)景观脆弱性综合指数时并未考虑地形、气候等因素，这是因为区域

景观类型可在一定程度上反映所处地理位置和气候特征,加之中小尺度上气候要素空间分异较小,一定程度上会影响研究结果的准确性和科学性,中大尺度研究中应予以充分考虑地形和气候要素的分异等。另一方面,目前对景观指数的内在生态学机理认识较为有限,很难保证评价体系的客观性,因此基于生态学内涵的景观指数研究是未来的研究重点。此外,应加强驱动因素空间上作用机制的探究,为制定可操作、更有效、更精准的生态管控修复方案提供科学参考。

4 结 论

基于1980—2020年景观类型数据,本文在3 km×3 km格网基础上分析了凉城县景观类型变化过程,并探讨了区域景观格局脆弱性的时空变化规律及其影响因素,主要结论如下:

(1) 各景观类型动态度在不同时段内具有不同的变化特征。除未利用地外,2010年前林地、草地及耕地变化较为频繁,而2010年以来水域、建设用地动态度较大。

(2) 近40 a景观格局脆弱性全局Moran's *I*指数大于0.160,总体上升,存在空间正相关性且空间聚集性增强,高-高值区位于曹碾满族乡和六苏木镇北部,低-低值区位于岱海及麦胡图镇南部;研究区生态环境质量逐步改善,LVII值由1980年的3.413下降到2020年的2.928。

(3) 研究区耕地LVI差异较大,林地、草地LVII较高,脆弱性排序为:林地>草地>耕地>未利用地>建设用地>水域。在垂直空间上,海拔1700~1900 m、坡度25°~40°片区景观脆弱度最高,而地势平坦、资源丰富的岱海盆地生态状况较好,但有变差趋势。灰色关联度分析发现,研究区生态状况更易受人类活动的影响。

参考文献(References):

[1] 孙鸿超, 张正祥. 吉林省松花江流域景观格局脆弱性变化及其驱动力[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 1005−1014. [Sun Hongchao, Zhang Zhengxiang. Change of landscape pattern vulnerability in the Songhua River Basin in Jilin Province and its driving forces[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 1005−1014.]

[2] Peters M K, Hemp A, Appelhans T, et al. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions [J]. Nature, 2019, 568(7750): 88−92.

[3] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, 2(2): e1500323.

[4] Corey L, Pedram R, Navin R. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529(7584): 84−87.

[5] Gideon B, Hirotaka M. A perception-based estimation of the ecological impacts of livelihood activities: The case of rural Ghana[J]. Ecological Indicators, 2018, 93(10): 424−433.

[6] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Change, 2007, 17(3): 472−485.

[7] 李鹤, 张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 920−929. [Li He, Zhang Pingyu. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change[J]. Progress in Geography, 2011, 30 (7): 920−929.]

[8] 王让会, 赵文斐, 彭擎, 等. 气候变化及景观格局与生态系统碳储存的耦合关系——以祁连山为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39 (1): 250−257. [Wang Ranghui, Zhao Wenfei, Peng Qing, et al. The relationship of climate change and landscape pattern with ecosystem carbon storage: A case study from the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 250−257.]

[9] Javed M, Hussein A W, Atiqur R, et al. Landscape dynamic characteristics using satellite data for a mountainous watershed of Abha, Kingdom of Saudi Arabia[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 72(12): 4973−4984.

[10] 梁保平, 雷艳, 覃业努, 等. 快速城市化背景下广西典型城市景观空间格局动态比较研究[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4526−4536. [Liang Baoping, Lei Yan, Qin Yenu, et al. Comparison of changing landscape patterns in the rapidly urbanizing cities of Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4526−4536.]

[11] 金梦婷, 徐丽萍, 徐权. 基于FLUS-Markov模型的多情景景观生态风险评价与预测——以南疆克州为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1793−1804. [Jin Mengting, Xu Liping, Xu Quan. FLUS-Markov model-based multiscenario evaluation and prediction of the landscape ecological risk in Kezhou, South Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1793−1804.]

[12] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120−1127. [Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridor in Shenmu City based on landscape ecological security[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1120−1127.]

[13] 荆忠伟. 大庆市主城区景观格局时空变化及其脆弱性响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021. [Jing Zhongwei. Spatiotemporal Change of Landscape Pattern and the Response of Vulnerability: A Case Study of the Main Urban Area in Daqing, China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.]

[14] 张金茜. 凉城县景观格局及其脆弱性时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Zhang Jinqian. Spatiotemporal Changes of Landscape Pattern and Its Vulnerability of Liangcheng County[D]. Lan-

zhou: Lanzhou University, 2019.]
[15] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 247-257. [Sun Caizhi, Yan Xiaolu, Zhong Jingqiu. Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (2): 247-257.]
[16] Preston B L, Yuen E J, Westaway R M. Putting vulnerability to climate change on the map: A review of approaches, benefits, and risks[J]. Sustainability Science, 2011, 6(2): 177-202.
[17] Min K, Song K, Chon J. Key coastal landscape patterns for reducing flood vulnerability[J]. Science of the Total Environment, 2020, 759(3): 143454.
[18] 张佳辰, 高鹏, 董学德, 等. 基于景观格局分析的青岛市海岸带生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 1022-1030. [Zhang Jiachen, Gao Peng, Dong Xuede, et al. Ecological vulnerability assessment of Qingdao coastal zone based on landscape pattern analysis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(8): 1022-1030.]
[19] 黄木易, 仲勇, 冯少茹, 等. 1970s以来巢湖流域水环境保护区景观生态脆弱性时空特征及驱动解析[J]. 湖泊科学, 2020, 32 (4): 977-988. [Huang Muyi, Zhong Yong, Feng Shaoru, et al. Spatial-temporal characteristic and driving analysis of landscape ecological vulnerability in water environment protection area of Chaohu Basin since 1970s[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 977-988.]
[20] 郭佳乐. 岱海湖生态的政府治理机制建设研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020. [Guo Jiale. Research on Government Governance Mechanism of Daihai Lake Ecology[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020.]
[21] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420. [Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1411-1420.]
[22] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1673-1676. [Jiang Yong, Zhang Yuge, Liang Wenju, et al. Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of in Sujiatun district, Shenyang City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1673-1676.]
[23] 暴向平, 周瑞平, 宋永永. 乌兰察布市生态安全与新型城镇化耦合协调度及其影响因素[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 64-70. [Bao Xiangping, Zhou Ruiping, Song Yongyong. The coupling coordination and and influencing factors of ecological safety and new-type urbanization in Ulanqab City[J]. Journal of Northwest Normal University(Natural Science Edition), 2021, 57 (5): 64-70.]
[24] 孔萌. 乌兰察布市耕地动态与干暖化时空特征以及生态脆弱性影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014. [Kong Meng. Ulanqab Cultivated Land Dynamics and the Spatial-Temporal Characteristics of Dry Warming and the Impact of Ecological Fragility[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.]
[25] 陈桃, 包安明, 郭浩, 等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析——以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2643-2657. [Chen Tao, Bao Anming, Guo Hao, et al. Ecological vulnerability assessment for a transboundary basin in Central Asia and its spatiotemporal characteristics analysis: Taking Amu Darya River Basin as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2643-2657.]
[26] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110. [Feng Yanwei, Zhen Jianghong, Ma Chenyang. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1096-1110.]
[27] 徐智超, 刘华民, 韩鹏, 等. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4354-4366. [Xu Zhichao, Liu Huamin, Han Peng, et al. Analysis of the characteristics and driving forces of the temporal and spatial evolution of ecological security in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4354-4366.]
[28] 赖其力孟格. 农牧交错区土地生态安全评价——以内蒙古乌兰察布市为例[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. [Lai Qilimengge. Land Ecological Safety Evaluation in Agro-Pastoral Zone: A Case of Ulanchap in Inner Mongolia[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.]
[29] 李金雷. 基于GGDP、GEP和GEEP的岱海流域绿色发展核算[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. [Li Jinlei. Green Development Accounting of Daihai Basin Based on GGDP, GEP GEEP[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.]
[30] 李建飞, 李小兵, 周义. 2000—2015年乌兰察布市生长季NDVI时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1238-1249. [Li Jianfei, Li Xiaobing, Zhou Yi. Spatiotemporal variation of NDVI and its affecting factors in Ulanqab city in growing season from 2000 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (5): 1238-1249.]
[31] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响:以岱海流域为例(2000—2018年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 727-738. [Liang Xu, Liu Huamin, Ji Meichen, et al. Effects of land use /cover change on lake water quality in the semi-arid region of northern China: A case study in Lake Daihai Basin (2000-2018)[J]. Lake Science, 2021, 33(3): 727-738.]
[32] 陈海英, 安莉娟, 张锦龙. 岱海湖水面面积演变特征及与气象因子关联度分析研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(12): 62-65. [Chen Haiying, An Lijuan, Zhang Jinlong. Characteristics of water surface area evolution and correlation analysis with meteorological factors in Bohai Lake[J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(12): 62-65.]

Landscape pattern vulnerability and its influencing factors on a semi-arid lake basin: A case study of Liangcheng County

ZHANG Yunxia[1], ZHANG Jinxi[1,2], GONG Jie[1]

(1. College of Earth and Environmental Sciences/Key Laboratory of Western China's Environmental Systems Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Research on landscape spatiotemporal variation and its pattern vulnerability can provide a scientific basis for regional landscape optimization and ecological protection. Based on six periods of landscape type data from 1980 to 2020, this paper analyzes the lake basin landscape and its variation process in Liangcheng County. Moreover, a comprehensive evaluation index of landscape vulnerability is constructed by using landscape sensitivity and adaptability indexes to analyze the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of landscape pattern vulnerability in the entire county. The main findings are listed below. (1) The landscape types of Liangcheng County have significantly changed over the past 40 years. Except for the unused land, the dynamic degree of cultivated land, forestland, and grassland from 1980 to 1995, that of each landscape type from 1995 to 2010, and that of waters and construction land from 2010 to 2020 are the largest, which indirectly reflects the life and production modes of the study area in different periods. (2) The landscape pattern vulnerability was mainly medium and high-grade with an area of more than 70% in Liangcheng Country from 1980 to 2020. The areas of high landscape pattern vulnerability were mainly concentrated in the central and southeast of Liangcheng, and the low-value areas were located in the Daihai and its northern parts. The landscape vulnerability integrated index generally decreased first; this index then increased and finally decreased. Moreover, the spatial aggregation increased, indicating that the ecological environment began to improve. (3) The vulnerability of ecological environments is significantly different in various landscape types and topographies in the study area. Forestland and grassland have more higher vulnerability and water has the lowest vulnerability among all landscape types. The landscape pattern vulnerability is the lowest in the area with an altitude of <1300 m and a slope of <5° and the highest with an altitude of 1700−1900 m and a slope of 25°−40° on different altitudes and slopes. (4) The gray correlation analysis revealed that the population, water area, and farmland area are the leading factors that affected the landscape pattern vulnerability, indicating that human activities significantly impacted the ecological environment more than climatic factors in the study area. Optimizing landscape structure, reducing excessive disturbance, and protecting water resources and their environment are the primary ways to reduce the vulnerability of landscape patterns and ecological protection in Liangcheng Country.

Keywords: lake-basin; landscape pattern ecological vulnerability; landscape pattern vulnerability integrated index; influencing factors; Liangcheng County